

Automatic wheelslip correction esp. on electric railway vehicles - adapts acceleration set-point to variability of coefft. of adhesion along track without driver intervention in max. traction mode

Patent number: DE4225683
Publication date: 1994-02-10
Inventor: PFEIFFER RUDOLF DR ING (DE); BUSCHER
MICHAEL DIPL ING (DE); SCHWARTZ HANS-
JUERGEN DIPL ING (DE)
Applicant: PFEIFFER RUDOLF DR ING (DE); BUSCHER
MICHAEL DIPL ING (DE); SCHWARTZ HANS
JUERGEN DIPL ING (DE)
Classification:
- **International:** B60K28/16; B61C15/08; B60L3/10
- **European:** B60K28/16; B60L3/10; B60T8/00B12
Application number: DE19924225683 19920804
Priority number(s): DE19924225683 19920804

Abstract of DE4225683

A desired value of acceleration (b_{soll}) is obtd. from addn. (32) of the output of a vehicle acceleration adaptation stage (2) to the variable acceleration shift (Δb) supplied by a logic circuit (31). The desired speed (v_{soll}) and torque (M_{soll}) derived from an integrator (5) and rotational speed regulator (7) are recalculated with allowance for the control signal (M_b) supplied by the driver via a limiter (1). The acceleration at the rim of the wheel is checked before and after each change from acceleration to braking and vice versa. An approximately constant desired speed may be set for starting a heavy train. **USE/ADVANTAGE** - On locomotives and trains with pref. torque-controlled electric traction motors, the transition between max. and min. tractive-effort modes requires no action by the driver.

Data supplied from the **esp@cenet** database - Worldwide



19 BUNDESREPUBLIK

DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

Patentschrift

DE 42 25 683 C 2

51 Int. Cl. 6:
B 60 L 3/10
B 60 K 28/16
B 61 C 15/08

21 Aktenzeichen: P 42 25 683.6-32
22 Anmeldetag: 4. 8. 92
43 Offenlegungstag: 10. 2. 94
45 Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: 23. 7. 98

DE 42 25 683 C 2

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

73 Patentinhaber:

Pfeiffer, Rudolf, Dr.-Ing., 6100 Darmstadt, DE;
Buscher, Michael, Dipl.-Ing., 6450 Hanau, DE;
Schwartz, Hans-Jürgen, Dipl.-Ing., 64293
Darmstadt, DE

72 Erfinder:

gleich Patentinhaber

56 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht gezogene Druckschriften:

DE 40 20 350 C2
DE 39 29 497 C2
DE 30 11 541 C2
DE 27 07 047 B2
DE 34 07 309 A1
EP 02 18 839 A2
EP 01 89 165 A2

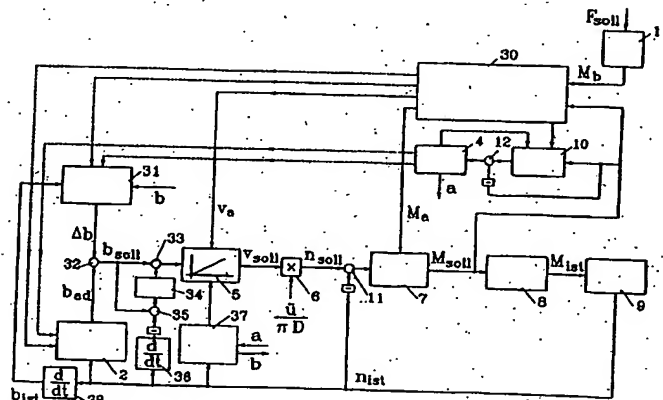
BAUER, Hans-Peter, PFEIFFER, Rudolf, HAHN, Karl:
"Optimale Kraftschlußausnutzung durch
selbstadap-
tierende Radschlupfregelung am Beispiel eines
Drehstrom-Lokomotivantriebes" in: Elektrische Bah-
nen 84 (1986) H.2, S.43-57;
DE-Z: HAHN, Karl: "Simulation einer selbstadap-
tierenden Radschlupfregelung für elektrische
Triebfahrzeuge" in: Elektrische Bahnen 87 (1989)
H.2, S.52-61;
DE-Z: KÖRBER, Joachim, PFEIFFER, Rudolf,
SCHLOSSER, Wolfgang: "Die Weiterentwicklung der
Leistungs- und Steuerungselektronik gemäß den
Anforderungen des modernen Schienenverkehrs"
in: ZEV-Glas. Ann. 114 (1990) Nr.11/12, S.503
bis 511;

54 Verfahren und Anordnung zur selbsttätigen Radschlupfregelung von Fahrzeugen mit drehmomentgeregeltem Antrieb

- 57 Verfahren zur selbsttätigen Radschlupfregelung von Fahrzeugen mit drehmomentgeregeltem Antrieb und vorzugsweise elektrischen Fahrmotoren unter Verwendung einer Beschleunigungssollwerte integrierenden Einrichtung und Bildung eines Drehzahlsollwerts (bzw. Geschwindigkeitssollwerts), der in Differenz zur Drehzahl des Fahrmotors, Radsatzes oder Rades den Antrieb für eine Anpassung der Radumfangbeschleunigung bzw. -verzögerung beeinflusst;
- bei dem einer Drehmomentregelung eine Drehzahlregelung überlagert ist, die eine Differenz eines durch Integration gewonnenen Drehzahlsollwerts n_{soll} mit der Drehzahl n_{ist} des Fahrmotors, des Radsatzes oder des Rades als Kriterium für die auf die Schiene oder Fahrbahn übertragene Zugkraft F_z wertet und daraus einen Drehmoment sollwert M_{soll} für den Drehmomentregler 8 ermittelt;
 - bei dem der Drehzahlsollwert n_{soll} über einen dem Integrator 5 zugeführten Beschleunigungssollwert b_{soll} beeinflussbar ist;
 - wobei ein Abfall des Drehmomentsollwerts M_{soll} nach anfänglicher Steigerung als Über- oder Unterschreitung einer jeweils optimalen, dem Kraftschlußmaximum zugeordneten Differenzgeschwindigkeit Δv_{opt} im Radaufstandspunkt gewertet und in eine Umschaltung des Beschleunigungssollwerts b_{soll} zwischen zwei Zuständen "Beschleunigungserhöhung" (b_1) oder "Beschleunigungsreduktion" (b_0) umgesetzt werden kann; dadurch gekennzeichnet, daß
 - der Beschleunigungssollwert b_{soll} als Summe einer unmittelbar gemessenen oder aus der Fahrmotor, Radsatz- oder Raddrehzahl n_{ist} adaptierten Fahrzeugbeschleunigung b_{ad} und einem veränderbaren Beschleunigungshub

Δb unabhängig vom Verhältnis Zugkraftsollwert F_{soll} zur Zugmasse (-last) m bestimmt wird;

- die vom Fahrzeugführer vorgegebene und über eine Begrenzungsstufe 1 gebildete und vom Zugkraftsollwert F_{soll} abgeleitete Drehmomentsteuergröße M_b dann zu einer Neuberechnung des Geschwindigkeitssollwerts v_{soll} und des Drehmomentsollwerts M_{soll} führt, wenn dieser gleich oder größer wird als die Drehmomentsteuergröße M_b ;
- vor und nach der Umschaltung zwischen den Zuständen "Beschleunigungserhöhung" und "Beschleunigungsreduktion" eine Überprüfung der Radumfangbeschleunigung b_{ist} erfolgt, deren Ergebnis ein erneutes Umschalten verhindern, auslösen oder zu einer Beeinflussung des Beschleunigungshubs Δb führen kann;
- beim Bremsen ein Extremwertspeicher 10 als ...



2.1 Überblick

Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren und eine Anordnung zur selbsttätigen Radschlupfregelung von Fahrzeugen mit drehmomentgeregeltem Antrieb gemäß Oberbegriff des Anspruchs 1 und eine Anordnung zur Durchführung des Verfahrens gemäß Oberbegriff des Anspruchs 17.

Zur Ausnutzung der physikalisch maximal möglichen Antriebskraft im Radaufstandspunkt muß jedes zu regelnde Rad in einem Arbeitspunkt möglichst nahe am Maximum der Kraftschlußkennlinie betrieben werden. Dies soll auch dann ohne Eingriff des Fahrzeugführers erreicht werden, wenn sich die Kraftschlußverhältnisse entlang der Strecke ändern. Hierbei sollen ausdrücklich sowohl Änderungen des maximalen Kraftschlußbeiwerts f_{\max} selbst als auch der dem maximalen Kraftschlußbeiwert f_{\max} zugeordneten Differenzgeschwindigkeit Δv_{opt} zugelassen werden. Andererseits darf das von der Radschlupfregelung eingestellte Drehmoment nie so groß werden, daß die entwickelte Antriebskraft größer wird als der vom Fahrzeugführer eingestellte Sollwert, gegebenenfalls unter Berücksichtigung einer Rückbegrenzung und der durch die Leistungsfähigkeit der Antriebsanlage gesetzten Grenzen. Dem Fahrzeugführer muß es also jederzeit möglich sein, beliebige Zug- oder Bremskräfte einzustellen, die kleiner sind als die unter den jeweiligen Bedingungen (z. B. trockene oder nasse Schienen, aktuelle Fahrgeschwindigkeit auf die Schiene übertragbaren Antriebskräfte).

Es wird von einem Stand der Technik ausgegangen, wie er durch /1/ oder /2/ gegeben ist. Die Erfindung ergänzt und modifiziert die dort beschriebenen Verfahren und Anordnungen so, daß die Anforderungen des praktischen Betriebs erfüllt werden.

Die in /1/ und /2/ beschriebenen Verfahren und Anordnungen leiden zunächst unter dem Mangel, daß sie nicht für den generatorischen Bremsbetrieb geeignet sind. Da diese Betriebsart insbesondere bei Schienenfahrzeugen mit elektrischen Fahrmotoren zur Vermeidung von Verschleiß an den Reibungsbremsen und wegen der Rückspeisung der Bremsenergie eine sehr große Bedeutung besitzt und strengen Sicherheitsanforderungen genügen muß, ist dieser Mangel erheblich.

Mit dem in /1/ beschriebenen Verfahren ist es nicht möglich, beliebig kleine Zug- oder Bremskräfte einzustellen, die kleiner sind als die maximal übertragbaren Antriebskräfte. Das in /2/ beschriebene Verfahren beseitigt mit Einschränkungen diesen Mangel zwar im Fahrbetrieb, nicht aber im Bremsbetrieb. Hinzu kommt, daß die in /1/ und /2/ beschriebenen Verfahren und Anordnungen immer einen extrem schnell regelbaren Fahrzeugantrieb voraussetzen, wie er keinesfalls auf allen Fahrzeugen ausgeführt oder ausführbar ist.

Aufgabe der Erfindung ist es, ein Verfahren gemäß dem Oberbegriff des Anspruchs 1 und eine Anordnung gemäß dem Oberbegriff des Anspruchs 17 dahingehend zu verbessern, daß im Motor- wie auch im Generatorbetrieb der Fahrmotoren sowohl bei nasser, vereister und/oder verschmutzter Schiene bzw. Fahrbahn die physikalisch maximal mögliche Antriebskraft im Radaufstandspunkt übertragen als auch bei guten Kraftschlußverhältnissen oder bei geringem Bedarf an Antriebskraft vom Fahrzeugführer beliebig kleine Antriebskräfte eingestellt werden können, wobei der Übergang zwischen diesen beiden Betriebsarten ohne besonderen Eingriff des Fahrzeugführers und ohne nachteilige Ausgleichsvorgänge erfolgt.

Diese Aufgabe wird bezüglich des Verfahrens durch die kennzeichnenden Merkmale des Anspruchs 1 und bezüglich der Anordnung durch die kennzeichnenden Merkmale des Anspruchs 17 gelöst.

Die Vorteile der Erfindung, im folgenden "Radschlupfregelung" genannt, gegenüber den bekannten Verfahren bestehen also darin, daß bei einer im Grenzfall vollständigen, stets aber sehr hohen Ausnutzung des jeweils verfügbaren Kraftschlusses im Radaufstandspunkt die bisher vorhandenen Nachteile vermieden werden:

- Es können stets beliebig kleine Zug- oder Bremskräfte eingestellt werden.
- Durch selbsttätige Regelung auf die optimale Differenzgeschwindigkeit im Radaufstandspunkt wird im Fahrbetrieb auch bei mäßig schnell regelbaren Antrieben die physikalisch maximal mögliche Zug- oder Bremskraft ausgeübt und unnötiger Verschleiß vermieden, wie er bei zu großer Differenzgeschwindigkeit auftritt.
- Durch die Vermeidung zu großer Differenzgeschwindigkeiten wird das Entstehen der für das Antriebssystem gefährlichen Reibschwingungen reduziert.

Anhand der Fig. 1 bis 3 wird die Erfindung nachstehend erläutert:

Fig. 1 zeigt ein Blockschaltbild der Radschlupfregelung für ein(en) Treibrad(satz).

Gepunktete Linien bezeichnen die Übertragung von binären Signalen. Gestrichelt eingezeichnete Blöcke und zugehörige Signalverbindungen sind für die ordnungsgemäße Funktion nicht zwingend erforderlich, ergeben jedoch ein verbessertes Verhalten.

Fig. 2 zeigt die Kraftschlußkennlinie, wie sie in der Literatur allgemein für den Zusammenhang von auf die Radaufstandskraft bezogener Radumfangskraft und Differenzgeschwindigkeit Δv im Radaufstandspunkt angenommen wird. Das Maximum ist mit X bezeichnet.

Fig. 3 zeigt den zeitlichen Verlauf charakteristischer Größen als Ergebnis einer Simulationsrechnung.

2.2 Prinzip der Radschlupfregelung

Die Blockstruktur (Fig. 1) läßt die Gemeinsamkeiten, aber auch die Unterschiede zu den in /1/ und /2/ beschriebenen Anordnungen erkennen. Die zentrale Funktion des Drehzahlregelkreises (Integrator 5 zur Bildung des Geschwindigkeitssollwerts, Multiplizierer 6, Subtrahierer 11 für den Soll- Ist-Vergleich, Drehzahlregler 7, Drehmomentregler + Umrichter + Fahrmotor 8, Antriebsstrang + Radaufstandspunkt 9) wird übernommen. Ein wesentlicher Unterschied besteht zunächst in der Bildung des dem Integrator 5 zugeführten Beschleunigungssollwerts b_{soll} , der abwechselnd die Werte b_0 und b_1 annimmt. Nach /1/ und /2/ wird b_0 auf einen Wert kleiner oder gleich 0 gesetzt ($b_0 \leq 0$). Der Wert b_1 wird nach /1/ und /2/ als Quotient F_{soll}/m berechnet, ist also dem durch den Fahrzeugführer vorgegebenen Zugkraftsollwert F_{soll} direkt

und einer fiktiven Zugmasse ("Last") umgekehrt proportional. Diese wird in der Lastadaptierungsstufe (Block 2 der Fig. 2 in /1/) gebildet.

Zweck des Beschleunigungswechsels $b_1 \rightarrow b_0 \rightarrow b_1 \dots$ ist die Verschiebung des Arbeitspunkts auf der Kraftschlußkennlinie zwischen einem Wert kurz vor dem Kraftschlußmaximum auf einen solchen kurz hinter dem Kraftschlußmaximum und wieder zurück. Hierzu ist unabdingbare Voraussetzung, daß der Beschleunigungssollwert b_1 größer und der zeitlich anschließende Beschleunigungssollwert b_0 kleiner als die Fahrzeugbeschleunigung b_z eingestellt wird:

$$b_0 < b_z < b_1 \quad (1)$$

Dies ist aber durch die in /1/ und /2/ beschriebenen Verfahren nicht gewährleistet. So kann beispielsweise bei Gefällefahrt die "Last" m zu Null werden. Auch wenn bei Fahrt in Beharrung die "Last" m richtig adaptiert wird, folgt nach /1/ und /2/ für den Beschleunigungssollwert $b_1 = b_z$. Damit behält der Arbeitspunkt seine Lage bei, wandert also nicht mehr in Richtung des Kraftschlußmaximums, was eine mangelhafte Kraftschlußausnutzung oder eine dauerhaft zu große Differenzgeschwindigkeit im Radaufstandspunkt zur Folge hat.

Ein wesentliches Merkmal der neuen, hier vorgeschlagenen Radschlupfregelung ist es, die Forderung (1) dadurch zu erfüllen, daß konsequent ein Wechsel des Beschleunigungssollwerts b_{soll} stattfindet zwischen einem Wert b_0 , der um einen Beschleunigungshub Δb_0 kleiner ist als eine "adaptierte" Fahrzeugbeschleunigung b_{ad} , zu einem Wert b_1 , der um einen Beschleunigungshub Δb_1 größer ist als die adaptierte Fahrzeugbeschleunigung b_{ad} :

$$b_0 = b_{\text{ad}} - \Delta b_0 \quad (2)$$

$$b_1 = b_{\text{ad}} + \Delta b_1 \quad (3)$$

Die Realisierung durch die Beschleunigungslogik 31 erfordert außer einer zweckmäßigen Vorgabe der grundsätzlich frei wählbaren Beschleunigungshübe Δb_0 und Δb_1 die Bildung einer adaptierten Fahrzeugbeschleunigung b_{ad} als Ersatz für die i.a. nicht unmittelbar verfügbare Fahrzeugbeschleunigung b_z . Diesem Zweck dient die in Fig. 1 skizzierte Beschleunigungsadaptionstufe 2. Somit sind Aufgabe und Wirkungsweise dieses Blocks vollkommen verschieden von der in /1/ und /2/ angegebenen Lastadaptierungsstufe.

2.3 Beschleunigungsadaption

Die Aufgabe der Beschleunigungsadaptionstufe 2 ist die Berechnung einer adaptierten Fahrzeugbeschleunigung b_{ad} , die der über einen sinnvollen Zeitraum gemittelten Fahrzeugbeschleunigung b_z möglichst gleich sein soll.

Zur Bestimmung der Fahrzeugbeschleunigung gibt es verschiedene Möglichkeiten. Die meisten beruhen auf der Tatsache, daß die Radumfangbeschleunigung im Mittel gleich der Fahrzeugbeschleunigung ist, solange sich die Differenzgeschwindigkeit Δv im Radaufstandspunkt nicht ständig in einer Richtung ändert.

Es werden hier zunächst zwei neue Methoden zur Beschleunigungsadaption vorgeschlagen:

1. Die Drehzahl n_{ist} wird zu jedem Umschaltzeitpunkt gemessen und gespeichert, in dem die Suchlogik 4 von "Beschleunigungsreduktion" auf "Beschleunigerungserhöhung" umschaltet. Die adaptierte Fahrzeugbeschleunigung b_{ad} zwischen zwei Umschaltzeitpunkten t_1 und t_2 läßt sich dann aus der Differenz zweier Drehzahlen, bezogen auf den zeitlichen Abstand ihrer Messung, bestimmen:

$$b_{\text{ad}} = \frac{\pi \cdot D}{\ddot{u}} \cdot \frac{n_{\text{ist}}(t_2) - n_{\text{ist}}(t_1)}{t_2 - t_1} \quad (4)$$

mit:

D = Raddurchmesser

\ddot{u} = Getriebeübersetzung.

Die Umschaltzeitpunkte t_1 und t_2 müssen dabei nicht zwingend unmittelbar aufeinander folgen, es kann sogar vorteilhafter sein, einen zeitlichen Mindestabstand einzuhalten, damit relativ schnelle Änderungen der Drehzahl n_{ist} (z. B. aufgrund eines sich stark ändernden Fahrbahn- oder Schienenzustands) nicht als Änderung der Fahrzeugbeschleunigung gewertet werden.

Die ausgewählten Umschaltzeitpunkte t_1 und t_2 sollten immer gleichsinnigen Umschaltungen zugeordnet sein, vorzugsweise den Umschaltungen von "Beschleunigungsreduktion" auf "Beschleunigerungserhöhung". Erstens liegt so der Arbeitspunkt immer im stabilen Bereich der Kraftschlußkennlinie ($\Delta v < \Delta v_{\text{opt}}$), und zweitens ist dann der Arbeitspunkt auf der Kraftschlußkennlinie annähernd gleich dem des vorhergehenden Meßzeitpunkts.

Bei einer Bildung der Fahrzeugbeschleunigung aus den Radumfangbeschleunigungen muß der Zeitraum der Ermittlung einerseits so lang sein, daß durch Kraftschlußsprünge verursachte Änderungen der Radumfangbeschleunigung nicht als Änderungen der Fahrzeugbeschleunigung gewertet werden. Andererseits muß der Zeitraum so kurz sein, daß auch schnelle Änderungen der Fahrzeugbeschleunigung b_z erkannt werden, so daß auch in kritischen Fällen (z. B. Anfahrt eines leichten Zuges oder Fahrzeugs, plötzliche Bremsung) die Fahrzeugbeschleunigung b_z nie kleiner als der Beschleunigungssollwert b_0 bzw. nie größer als der Beschleunigungssollwert b_1 werden kann.

2. Neben der Möglichkeit, die Fahrzeugbeschleunigung aus der Drehzahl n_{ist} zu berechnen, kann diese auch unmittelbar mit einem auf dem Fahrzeug installierten Beschleunigungsaufnehmer gemessen werden. Solche Geräte sind

mit sehr guter Genauigkeit erhältlich. Sie benötigen nur wenig Platz und lassen sich an einer beliebigen Stelle des Fahrzeugkastens anbringen. Allerdings sind sie so auszurichten, daß nur die Längsbeschleunigung gemessen wird.
3. Die adaptierte Fahrzeugbeschleunigung b_{ad} läßt sich auch mit den in /1/ beschriebenen Ansätzen errechnen:

$$b_{ad} = \frac{1}{k \cdot T} \int_0^{kT} b_{soll} dt \quad k = 1, 2, 3 \dots \quad (5)$$

T = Periodendauer der Suchlogik

oder:

$$b_{ad} = \frac{d}{dt} \left[\bar{n}_{ist} \right] \quad (6)$$

\bar{n}_{ist} = geglättete Drehzahl

Für den Betriebsfall "Begrenzerbetrieb" gelten besondere Bedingungen für die Adaption der Fahrzeugbeschleunigung. Diese werden in Abschnitt 2.5 behandelt.

2.4 Beschleunigungslogik

Nach /1/ und /2/ wird ausschließlich der Drehmomentsollwert M_{soll} in Verbindung mit dem zuletzt erreichten maximalen Drehmomentsollwert M_{max} zur Bildung des binären Ausgangssignals der Suchlogik 4 ausgewertet.

Zur Verbesserung der Kraftschlußausnutzung und zur sicheren Führung des Rades oder Radsatzes wird insbesondere bei nur langsam regelbaren Antrieben vorgeschlagen, auch die Radumfangsbeschleunigung auszuwerten und für die Bildung des binären Ausgangssignals der Suchlogik zu verwenden. Hierzu soll die Beschleunigungslogik 31 folgende zusätzliche Aufgaben übernehmen:

1. Überprüfung der Radumfangsbeschleunigung vor dem Umschalten von "Beschleunigungsreduktion" auf "Beschleunigungserhöhung"

Um sicherzustellen, daß beim Wechsel von "Beschleunigungsreduktion" auf "Beschleunigungserhöhung" der Arbeitspunkt im stabilen Bereich ($\Delta v < \Delta v_{opt}$) der Kraftschlußkennlinie liegt, ist es zweckmäßig, vor dem Wechsel die Radumfangsbeschleunigung zu überprüfen. Ist die Radumfangsbeschleunigung b_{ist} kleiner als die Fahrzeugbeschleunigung b_z , so bewegt sich der Arbeitspunkt auf der Kraftschlußkennlinie (Fig. 2) nach links. Es muß deshalb auf jeden Fall die Radumfangsbeschleunigung kleiner als die Fahrzeugbeschleunigung sein ($b_{ist} < b_z$), bevor die Suchlogik die "Beschleunigungserhöhung" einstellen darf. Da diese Bedingung aber nur sicherstellt, daß sich der Arbeitspunkt auf der Kraftschlußkennlinie (Fig. 2) nach links bewegt, nicht aber, daß er sich schon im stabilen Bereich ($\Delta v < \Delta v_{opt}$) befindet, soll nach Erfüllen der Bedingung $b_{ist} < b_z$ noch eine vorgebbare Zeit gewartet und/oder die Bedingung $b_{ist} < b_z$ verschärft werden (z. B. in Form von $b_{ist} < b_z - \Delta b_s$). Da die Fahrzeugbeschleunigung b_z i. a. nicht bekannt ist, kann statt dieser die adaptierte Fahrzeugbeschleunigung b_{ad} verwendet werden. Die Suchlogik 4 darf somit erst dann die "Beschleunigungserhöhung" veranlassen, wenn für eine vorgegebene Zeit die Radumfangsbeschleunigung b_{ist} um mehr als einen vorgebbaren Wert Δb_s kleiner als die adaptierte Fahrzeugbeschleunigung b_{ad} ist:

$$b_{ist} < b_{ad} - \Delta b_s \text{ mit: } \Delta b_s = \text{Konstante} \quad (7)$$

2. Überprüfung der Radumfangsbeschleunigung nach dem Umschalten von "Beschleunigungserhöhung" auf "Beschleunigungsreduktion"

Sehr starke Kraftschlußeinbrüche können – insbesondere bei nur langsam regelbaren Antrieben – dazu führen, daß der Arbeitspunkt auf der Kraftschlußkennlinie längere Zeit im instabilen Bereich ($\Delta v > \Delta v_{opt}$) liegt. Der verfügbare Kraftschluß wird dann nur unvollständig ausgenutzt, vor allem aber entsteht die Gefahr aufklingender Reibschwingungen. Es wird deshalb im Fall eines starken Kraftschlußeinbruchs vorgesehen, den aktuellen Beschleunigungssollwert $b_{soll} = b_0$ deutlich zu verkleinern (z. B. durch Vergrößern des Beschleunigungshubs Δb_0). Als Kriterium zum Erkennen eines starken Kraftschlußeinbruchs wird die Überwachung der Radumfangsbeschleunigung auf folgende Weise vorgeschlagen: Zu jedem Umschaltzeitpunkt von "Beschleunigungserhöhung" auf "Beschleunigungsreduktion" wird die Radumfangsbeschleunigung b_{ist} abgespeichert. Vergrößert sich trotz der nach dem Umschaltzeitpunkt vorliegenden "Beschleunigungsreduktion" die Radumfangsbeschleunigung gegenüber der beim Umschaltzeitpunkt abgespeicherten Beschleunigung um einen vorgegebenen Wert, so liegt ein starker Kraftschlußeinbruch vor, und der aktuelle Beschleunigungssollwert $b_{soll} = b_0$ wird (z. B. durch Vergrößern des Beschleunigungshubs Δb_0) verkleinert. Ansonsten bleibt die Funktion der Radschlupfregelung unverändert.

3. Vergrößerung der Radumfangbeschleunigung mit dem Beschleunigungssollwert

Bei sehr steiler Kraftschlußkennlinie im Bereich kleiner Differenzgeschwindigkeiten bewegt sich der im stabilen Bereich der Kraftschlußkennlinie liegende Arbeitspunkt nur sehr langsam in Richtung Kraftschlußmaximum, d. h. der zur Verfügung stehende Kraftschluß wird nur unvollständig genutzt. Es wird deshalb empfohlen, oberhalb einer bestimmten Differenz zwischen Radumfangbeschleunigung b_{ist} und Beschleunigungssollwert b_{soll} den Beschleunigungssollwert zusätzlich zu vergrößern, damit der vom Drehzahlregler 7 berechnete Drehmomentsollwert M_{soll} schnell ansteigt. Diese Drehmomenterhöhung muß einerseits so gewählt werden, daß sich der Arbeitspunkt schnell in Richtung Kraftschlußmaximum bewegt, so daß der zur Verfügung stehende Kraftschluß möglichst gut genutzt wird. Andererseits darf der Drehmomentsollwert beim Überschreiten des Kraftschlußmaximums nicht so groß sein, daß der Arbeitspunkt unnötig weit in den instabilen Bereich wandert.

Es wird vorgeschlagen, in Abhängigkeit von der Differenz zwischen Beschleunigungssollwert b_{soll} und Radumfangbeschleunigung b_{ist} den Beschleunigungssollwert b_{soll} um einen von der Zusatzbeschleunigungslogik 34 berechneten Betrag zu erhöhen und den so berechneten Wert b_{sollk} dem Integrator 5 als Eingangsgröße vorzugeben. Sinnvoll ist beispielsweise die Vergrößerung von b_{soll} um einen Anteil, der quadratisch von der Differenz $b_{soll} - b_{ist}$ abhängig ist:

$$b_{sollk} = b_{soll} + K \cdot (b_{soll} - b_{ist})^2 \quad (8)$$

mit: K = Konstante

Große Abweichungen werden somit stärker gewichtet als kleine.

Die Beschleunigungssollwerterhöhung führt zu einer Erhöhung des Drehzahlsollwerts n_{soll} , so daß die Regelabweichung $n_{soll} - n_{ist}$ größer wird und der Drehzahlregler wie gewünscht den Drehmomentsollwert M_{soll} erhöht. Die zusätzliche Drehmomenterhöhung wird selbsttätig reduziert, sobald die Abweichung zwischen Beschleunigungssollwert b_{soll} und Radumfangbeschleunigung b_{ist} wieder kleiner wird, so daß das Kraftschlußmaximum nicht unnötig weit in Richtung des instabilen Bereichs überschritten wird.

2.5 Begrenzerbetrieb

Oft muß bei trockener Schiene und fast immer bei Beharrungsfahrt in der Ebene vom Fahrzeug weniger Zugkraft aufgebracht werden, als aufgrund der Kraftschlußverhältnisse übertragen werden könnte. Ganz allgemein muß der Fahrzeugführer die Möglichkeit haben, eine beliebig kleine Zugkraft F_{soll} einstellen zu können. Abgesehen von einem reduzierenden Eingriff zum Schutz der Antriebsanlage oder zur Rückbegrenzung bildet die Begrenzungsstufe 1 aus dem Zugkraftsollwert F_{soll} unter Berücksichtigung des Raddurchmessers D und der Getriebeübersetzung i die Drehmomentsteuergröße M_b nach folgender Formel:

$$M_b = \frac{F_{soll} \cdot D}{2 \cdot i} \quad (9)$$

Die Bestimmung des Beschleunigungssollwerts b_{soll} nach der im Abschnitt 2.2 angegebenen Methode stellt zwar sicher, daß immer das Maximum der Kraftschlußkennlinie gesucht wird. Sie ermöglicht aber keine Begrenzung des Drehmomentsollwerts M_{soll} auf M_b .

In /1/ wird vorgeschlagen, den Drehzahlsollwert n_{soll} als Integral des Quotienten F_{soll}/m zu berechnen. Dieser Vorschlag wird in /2/ übernommen. Damit hängt aber die Drehmomentsollwertvorgabe auch von der korrekten Berechnung der "Last" m und nicht mehr allein vom Zugkraftsollwert F_{soll} des Fahrzeugführers ab. Diese indirekte Vorgabe ist nicht sicher im Sinne der Sicherheitsregeln für Fahrzeuge, zumindest aber ungenau. Wird beispielsweise die "Last" m von der Lastadaptierungsstufe zu groß vorgegeben, so wird eine kleinere Antriebskraft ausgeübt als vorgegeben, selbst wenn die aktuellen Kraftschlußverhältnisse eine höhere Antriebskraft zuließen. Außerdem entsteht infolge des zwischengeschalteten Integrators immer eine Zeitverzögerung, wodurch beispielsweise präzise Rangiermanöver unmöglich sind. Es wird deshalb folgende neue Methode zur Vorgabe eines beliebig kleinen Zugkraftsollwerts F_{soll} vorgeschlagen: Immer dann, wenn der vom Drehzahlregler 7 ausgegebene Drehmomentsollwert M_{soll} größer würde als die Drehmomentsteuergröße M_b , werden die Ausgangsgröße v_{soll} des Integrators 5 und die Ausgangsgröße M_{soll} des Drehzahlreglers 7 über die Begrenzerlogik 30 auf sinnvolle Werte gesetzt.

Diese Werte werden im Gegensatz zu /2/ unabhängig vom Betrag wirksam, um den M_{soll} größer als M_b ist. Sobald überhaupt eine meßbar kleine positive Differenz $M_{soll} - M_b$ auftritt, veranlaßt die Begrenzerlogik eine Veränderung der Ausgangsgrößen v_{soll} und M_{soll} derart, daß diese Differenz sofort wieder zu Null wird.

Somit kann die in /2/ erforderliche Minimalwertstufe 20 entfallen. Diese ist nur deshalb notwendig, weil das Ausgangssignal M_{soll} des Drehzahlreglers 7 aufgrund der in /2/ vorgeschlagenen ausschließlichen Beeinflussung der Ausgangsgröße v_{soll} des Integrators 5 in Abhängigkeit von der Differenz $M_{soll} - M_{soll}^*$ größer werden kann als die Steuergröße M_{soll}^* . Insbesondere bei guten Kraftschlußverhältnissen und/oder entsprechend kleiner Zugkraftsollwertvorgabe F_{soll} des Fahrzeugführers wird der vom Drehzahlregler 7 vorgegebene Drehmomentsollwert M_{soll} dauerhaft die Steuergröße M_{soll}^* überschreiten. Nach Verfahren und Anordnung /2/ besitzt dadurch der Drehmomentsollwert M_{soll} einen zu großen Wert, der bei plötzlichen Kraftschlußeinbrüchen vom Drehzahlregler 7 nicht beliebig schnell reduziert werden kann. Deshalb läßt sich mit Verfahren /2/ in diesem Betriebsfall ein transientes Schleudern nicht verhindern.

Durch die hier erfindungsgemäß vorgeschlagene direkte Beeinflussung des Drehmomentsollwerts M_{soll} ist sichergestellt, daß bei plötzlichen Kraftschlußeinbrüchen der Drehmomentsollwert M_{soll} auch dann unverzüglich auf einen entsprechend kleinen Wert reduziert wird, wenn der bis dahin anstehende Ausgangswert M_{soll} den bisherigen maximal mög-

lichen Kraftschluß nicht ausgenutzt hat. Es wird dann nämlich ohne Verzögerung die Suchlogik 4 aktiv.

- Durch die hier neu eingeführten Signale v_a und M_a (s. Fig. 1) sind der Geschwindigkeitssollwert v_{soll} und der Drehmomentsollwert M_{soll} so zu bestimmen, daß die Radschlupfregelung bei plötzlichen Kraftschlußeinbrüchen sofort den Drehmomentsollwert M_{soll} reduziert, den Begrenzerbetrieb verläßt und das neue Kraftschlußmaximum mit Hilfe der Suchlogik sucht. Die Bestimmung des Geschwindigkeitssollwerts v_{soll} und des Drehmomentsollwerts M_{soll} ist von der gewählten Reglerstruktur abhängig. Bei Verwendung eines P-Reglers kann gebildet werden:

$$v_{soll} = \frac{\pi \cdot D}{\ddot{u}} \cdot \left[\frac{K_r \cdot M_b}{KPDR} + n_{ist} \right] \quad (10)$$

oder:

$$v_{soll} = \frac{\pi \cdot D}{\ddot{u}} \cdot n_{istg} - K_{red} \quad (11)$$

$$M_{soll} = KPDR \cdot \left[\frac{\ddot{u}}{\pi \cdot D} \cdot v_{soll} - n_{ist} \right] \quad (12)$$

oder:

$$M_{soll} = M_b \quad (13)$$

mit:

D = Raddurchmesser

\ddot{u} = Getriebeübersetzung

K_r = Reduktionsfaktor

K_{red} = Reduktionswert

n_{istg} = geglättete Drehzahl

$KPDR$ = Proportionalverstärkung des Drehzahlreglers

Bei Verwendung eines PI-Reglers kann gebildet werden (1. Möglichkeit):

$$v_{soll} - v_{sollalt} - K_{red} \quad (14)$$

oder:

$$v_{soll} = \frac{\pi \cdot D}{\ddot{u}} \cdot n_{istg} - K_{red} \quad (15)$$

$$M_P = KPDR \cdot \left(\frac{\ddot{u}}{\pi \cdot D} \cdot v_{soll} - n_{ist} \right) \quad (16)$$

$$M_I = M_b - M_P \quad (17)$$

$$M_{soll} = M_P + M_I \quad (18)$$

mit:

D = Raddurchmesser

\ddot{u} = Getriebeübersetzung

K_{red} = Reduktionswert

$v_{sollalt}$ = Geschwindigkeitssollwert der vorhergehenden Berechnung

n_{istg} = geglättete Drehzahl

$KPDR$ = Proportionalverstärkung des Drehzahlreglers

M_P = P-Anteil des Drehzahlreglers

M_I = I-Anteil des Drehzahlreglers

oder (2. Möglichkeit):

$$v_{soll} - v_{sollalt} \text{ für } n_{soll} \geq n_{ist} \quad (19)$$

$$v_{soll} - v_{soll} + K_v \text{ für } n_{soll} < n_{ist} \quad (20)$$

$$M_I = M_b \quad (21)$$

$$M_{soll} = M_I \quad (22)$$

mit:

K_v = Vergrößerungswert

v_{sollalt} = Geschwindigkeitssollwert der vorhergehenden Berechnung
 M_1 = I-Anteil des Drehzahlreglers

Nach dem Setzen des Integrators auf den neuen Geschwindigkeitssollwert v_{soll} und der Neuberechnung des Drehmomentsollwerts M_{soll} ist es vorteilhaft, das binäre Ausgangssignal der Suchlogik auf "Beschleunigungserhöhung" zu schalten. Damit ist sichergestellt, daß die Radschlupfregelung auch im Begrenzerbetrieb ständig versucht, den Arbeitspunkt auf der Kraftschlußkennlinie nach rechts – also in Richtung auf das Kraftschlußmaximum – zu bewegen.

Da sich die Fahrzeugbeschleunigung selbstverständlich auch im Begrenzerbetrieb ändern kann, muß in dieser Betriebsart ebenfalls eine Beschleunigungsadaption stattfinden. Die Radschlupfregelung befindet sich – wie beschrieben – im Begrenzerbetrieb ständig im Zustand "Beschleunigungserhöhung". Eine Umschaltung zwischen den Zuständen "Beschleunigungsreduktion" und "Beschleunigungserhöhung" findet also nicht statt. Deshalb kann die erste vorgeschlagene Methode der Beschleunigungsadaption (Gleichung (4)) nur im Such-, nicht aber im Begrenzerbetrieb angewendet werden. Aus ähnlichen Gründen läßt sich auch die in /1/ (Anspruch 6) vorgeschlagene Methode zur Bestimmung der Fahrzeugbeschleunigung (Gleichung (5)) nicht im Begrenzerbetrieb anwenden. Die in /1/ (Anspruch 7) vorgeschlagene Methode ist mit folgendem Problem verbunden: Zum einen darf der Zeitraum, innerhalb dessen n_{ist} gemittelt wird, nicht zu klein sein, damit kurzzeitige Änderungen der Drehzahlen n_{ist} (z. B. durch einen Kraftschlußverfall) nicht als Änderungen der Fahrzeugbeschleunigung mißdeutet werden. Zum anderen darf sich innerhalb des Mittelungszeitraums die Fahrzeugbeschleunigung nicht so stark ändern, daß Ungleichung (1) nicht mehr erfüllt ist.

Die in Abschnitt 2.3 vorgeschlagene Möglichkeit, die Fahrzeugbeschleunigung mit einem Beschleunigungsaufnehmer zu messen; ist auch im Begrenzerbetrieb anwendbar. Für den Begrenzerbetrieb wird außerdem folgende neue Methode vorgeschlagen:

Zu jedem Zeitpunkt, zu dem der vom Drehzahlregler 7 vorgegebene Drehmomentsollwert M_{soll} größer wird als die Steuergröße M_b , wird der Zählerstand z eines Zählers in der Begrenzerlogik 30 um den Wert 1 erhöht. Hat der Zählerstand den vorgegebenen Wert z_{max} erreicht, berechnet die Beschleunigungsadaptionsstufe 2 einen Wert für die adaptierte Fahrzeugbeschleunigung b_{ad} . Hierdurch ausgelöst wird der Zählerstand auf Null zurückgesetzt. Der Wert der adaptierten Fahrzeugbeschleunigung b_{ad} kann analog zur ersten vorgeschlagenen Möglichkeit der Beschleunigungsadaption aus der Differenz zweier Drehzahlen, bezogen auf den zeitlichen Abstand ihrer Messung, bestimmt werden:

$$b_{\text{ad}} = \frac{\pi \cdot D}{\ddot{u}} \cdot \frac{n_{\text{ist}}(t_b) - n_{\text{ist}}(t_a)}{t_b - t_a} \quad (23)$$

mit:

D = Raddurchmesser

\ddot{u} = Getriebeübersetzung

Zu den Zeitpunkten t_a und t_b hat der Zählerstand jeweils den Wert z_{max} erreicht. Der Wert z_{max} ist so vorzugeben, daß sich während der Zeit $t_b - t_a$ die Fahrzeugbeschleunigung nicht so stark ändern kann, daß Ungleichung (1) nicht mehr erfüllt ist. Der Zähler stellt sicher, daß bei einem plötzlichen Kraftschlußeinbruch oder bei einer Erhöhung des Zugkraftsollwerts über die übertragbare Zugkraft hinaus keine Beschleunigungsadaption stattfinden kann. Denn in diesen Fällen wird M_{soll} sofort kleiner als M_b , so daß der Zählerstand nicht weiter erhöht wird. Dies ist der wesentliche Vorteil eines Zählers gegenüber Methoden der Mittelwertbildung oder Glättung.

2.6 Schweranfahrlogik

Die Kraftschlußausnutzung entscheidet, ob die Anfahrt eines schweren Zuges in der Rampe auf nasser Schiene gelingt oder nicht. Insbesondere bei niedrigen Geschwindigkeiten und sehr kleiner Fahrzeugbeschleunigung besteht die Gefahr, daß der Arbeitspunkt auf der Kraftschlußkennlinie durch eine zu große Radumfangbeschleunigung zu weit nach rechts ($\Delta v > \Delta v_{\text{opt}}$) wandert und Reibschwingungen aufklingen. Außerdem ist bei einer Schweranfahrt zu beachten, daß sich der Zug zunächst nicht oder nur sehr langsam in Bewegung setzen wird, d. h. die Radaufstandspunkte werden sich nicht oder nur sehr langsam in Fahrtrichtung bewegen. Es sind deshalb unter allen Umständen zu hohe Radumfangsgeschwindigkeiten zu vermeiden, denn sie führen aufgrund der entstehenden sehr großen Reibungswärme im Radaufstandspunkt zu Beschädigungen am Schienenkopf. Um auch schwere Züge mit höchster Kraftschlußausnutzung und unter Vermeidung unnötig hoher Radumfangsgeschwindigkeiten anfahren zu können, wird vorgeschlagen, die Radschlupfregelung um die Schweranfahrlogik 37 zu erweitern:

Die Schweranfahrlogik muß zunächst in der Lage sein, selbständig zu erkennen, wann eine Schweranfahrt vorliegt. Hierfür soll folgendes Kriterium gelten: Ist bei einem Wechsel von "Beschleunigungserhöhung" auf "Beschleunigungsreduktion" die Drehzahl n_{ist} kleiner als eine vorgegebene Drehzahlschwelle, so liegt eine Schweranfahrt vor.

Hat die Schweranfahrlogik erkannt, daß eine Schweranfahrt vorliegt, so gibt sie über den Integrator 5 einen sehr kleinen Geschwindigkeitssollwert v_{soll} vor, aus dem die Führungsgröße des Drehzahlregelkreises gebildet wird. Dieser Geschwindigkeitssollwert v_{soll} wird solange konstant vorgegeben, bis der Zug beschleunigt. So wird mit Hilfe des Drehzahlregelkreises auch bei sehr schlechten Kraftschlußverhältnissen sichergestellt, daß der Radsatz bzw. das Rad nicht schleudert, denn die Drehzahl wird nicht über das Kraftschlußmaximum hinaus erhöht. Außerdem wird durch das gleichmäßige, langsame Drehen der Räder der Kraftschlußbeiwert erhöht:

Laubbeschmutzte, nasse oder feuchte Schienen werden durch die entstehende geringe Reibungswärme gesäubert und getrocknet. Eine Beschädigung des Schienenkopfes ist jedoch wegen der kleinen, geregelten Radumfangsgeschwindigkeit ausgeschlossen.

Sobald der Zug beschleunigt, muß die Radumfangsgeschwindigkeit erhöht werden, damit der verfügbare Kraftschluß weiterhin vollständig genutzt wird. Deshalb muß die Schweranfahrlogik erkennen, wann sich der Zug in Bewegung setzt, also beschleunigt.

Die hierzu vorgeschlagene Methode beruht auf folgendem physikalischen Zusammenhang: Zur Regelung der Radsätze auf konstante Drehzahl gibt der Drehzahlregler einen Drehmomentsollwert M_{soll} vor, der im Mittel der übertragbaren Zugkraft entspricht. Durch den Reinigungseffekt der langsam drehenden Räder wird die übertragbare Zugkraft und damit auch der Drehmomentsollwert M_{soll} ansteigen. Ist die übertragbare Zugkraft so groß, daß sich der Zug in Bewegung setzt, also beschleunigt, wandert der Arbeitspunkt auf der Kraftschlußkennlinie nach links. Dadurch verkleinert der Drehzahlregler den Drehmomentsollwert M_{soll} . Wird nun der Drehmomentsollwert M_{soll} so stark geglättet, daß M_{soll} nur bei einer Beschleunigung des Zuges und nicht bei kurzen Drehzahlerhöhungen aufgrund von Kraftschlußschwankungen oder Änderungen der Radaufstandskräfte durch Drehgestellbewegungen verkleinert wird, so kann die in /1/ beschriebene Anordnung, bestehend aus Maximalwertspeicher 10, Subtrahierer 12 und Suchlogik 4, dazu verwendet werden, zu erkennen, wann sich der Zug in Bewegung gesetzt hat.

Sobald diese Anordnung das Beschleunigen des Zuges aufgrund der Verkleinerung von M_{soll} erkannt hat, schaltet die Suchlogik auf "Beschleunigungserhöhung", um den Arbeitspunkt auf der Kraftschlußkennlinie (Fig. 2) nach rechts zu verschieben. Anschließend arbeitet die Radschlupfregelung nach den in Abschnitten 2.2 und 2.3 beschriebenen Verfahren. Ein sinnvoller, von der Schweranfahrtlogik einzustellender Geschwindigkeitssollwert v_{soll} kann sowohl ein kleiner, fest vorgegebener Wert, als auch ein aus der Drehzahl n_{ist} vor dem Erkennen der Schweranfahrt gewonnener Wert sein.

Zur Regelung auf einen konstanten Geschwindigkeitssollwert v_{soll} wird vorgeschlagen, den Integrator 5 auf den gewünschten Geschwindigkeitssollwert v_{soll} zu setzen und den Beschleunigungssollwert $b_{\text{soll}} = b_2 = 0$ vorzugeben. Es kann auch $b_2 \approx 0$ gewählt werden. Kleine positive Werte b_2 führen dazu, daß die Radsatzdrehzahl langsam erhöht wird, was sinnvoll sein kann, wenn die zu befördernden Züge nicht zu schwer sind und sich deshalb in kurzer Zeit in Bewegung setzen werden. Sobald die Schweranfahrtlogik erkannt hat, daß sich der Zug bewegt, setzt sie ihr Ausgangssignal auf Null. Die Beschleunigungslogik 31 gibt hierauf den Beschleunigungssollwert $b_{\text{soll}} = b_1$ aus, so daß der bereits beschriebene Suchbetrieb beginnt.

2.7 Bremsbetrieb

Für das Bremsen gelten ähnliche physikalische Gesetzmäßigkeiten wie für das Fahren: Die Kraftübertragung im Radaufstandspunkt läßt sich durch eine ähnliche Kraftschlußkennlinie wie beim Fahren beschreiben. Die Radschlupfregelung ist daher nach entsprechenden Modifikationen für Fahren und Bremsen gleichermaßen geeignet.

Liegt der Steuerbefehl "Fahren" vor, so wird der vom Fahrzeugführer vorgegebene Zugkraftsollwert F_{soll} , wie bereits in Abschnitt 2.5 beschrieben, in die Steuergröße M_b umgerechnet:

$$M_b = \frac{F_{\text{soll}} \cdot D}{2 \cdot \ddot{u}} \quad \text{mit:} \quad \begin{array}{ll} D & = \text{Raddurchmesser} \\ \ddot{u} & = \text{Getriebeübersetzung} \end{array} \quad (24)$$

Diese Umrechnung erfolgt beim Bremsbefehl analog wie beim Fahrbefehl, allerdings erhält die aus dem Bremskraftsollwert B_{soll} gewonnene Steuergröße M_b ein negatives Vorzeichen:

$$M_b = - \frac{B_{\text{soll}} \cdot D}{2 \cdot \ddot{u}} \quad (25)$$

Beim Bremsen muß das negative Kraftschlußmaximum erkannt werden. Dazu ist der Maximalwertspeicher durch einen Minimalwertspeicher zu ersetzen. Dieser speichert nicht mehr den größten positiven Drehmomentsollwert M_{soll} , sondern den dem Betrag nach größten Drehmomentsollwert M_{soll} , der seit dem letzten Rücksetzen aufgetreten ist. Das Umschalten der Suchlogik in den komplementären Zustand wird wie bisher durch den Vergleich von M_{soll} und M_{max} am Subtrahierer 12 ausgelöst.

Die Auswahl zwischen Maximalwertspeicher und Minimalwertspeicher erfolgt gesteuert: Bei anstehendem Fahrbefehl wird der Maximalwertspeicher, bei anstehendem Bremsbefehl der Minimalwertspeicher verwendet. Die Speicher werden im Extremwertspeicher 10 zusammengefaßt.

Weiterhin sind die Vorzeichen der von der Beschleunigungslogik 31 auszuwählenden Beschleunigungshübe Δb_0 und Δb_1 zu vertauschen. Es wird also der Beschleunigungssollwert b_0 als Summe der adaptierten Fahrzeugbeschleunigung b_{ad} und eines Beschleunigungshubs Δb_0 vorgegeben. Analog wird der Beschleunigungssollwert b_1 aus der um den Beschleunigungshub Δb_1 verminderten adaptierten Fahrzeugbeschleunigung b_{ad} gebildet:

$$b_0 = b_{\text{ad}} + \Delta b_0 \quad (26)$$

$$b_1 = b_{\text{ad}} - \Delta b_1 \quad (27)$$

2.8 Beispiel

Fig. 3 zeigt für eine Anfahrt einer leertahrenden Lok mit 84 t Gesamtfahrmasse die Zeitverläufe charakteristischer Größen als Ergebnis einer Simulationsrechnung. Im einzelnen sind aufgetragen:

- F_{soll} vom Fahrzeugführer eingestellter Zugkraftsollwert
- F_{max} maximal übertragbare Zugkraft
- F übertragene Zugkraft

M_b Steuergröße (entsteht nach Rückbegrenzung und Berücksichtigung der Leistungsgrenzen der Antriebsanlage)
 M_{soll} Drehmoment Sollwert für Drehmomentregler
 b_{soll} Beschleunigungssollwert
 b_{ad} adaptierte Fahrzeugbeschleunigung
 b_z Fahrzeugbeschleunigung
 n_{soll} Drehzahlsollwert für Drehzahlregler
 n_{ist} Drehzahl des Treibradsatzes
 v_u Radumfangsgeschwindigkeit
 v_z Fahrzeuggeschwindigkeit

Das Beispiel der leerfahrenden Lok wurde deshalb gewählt, weil so in einem weiten Geschwindigkeitsbereich vom Stillstand bis etwa 100 km/h die wichtigsten Betriebszustände der Radschlupfregelung und die zugehörigen Regelvorgänge mit ausreichender zeitlicher Auflösung dargestellt werden können. Die Beschleunigung eines schweren Zuges auf die gleiche Geschwindigkeit dauert dagegen sehr viel länger, so daß der dann erforderliche Zeitmaßstab die Regelvorgänge weniger gut erkennen ließe.

Im Achsenkreuz 1 sind die Summenzugkräfte für die vierachsige Lok angegeben. Die im Radaufstandspunkt übertragbare Höchstzugkraft der gesamten Lok beträgt $F_{max} = 190$ kN. Dies entspricht einem angenommenen maximalen Kraftschlußbeiwert $f_{max} = 0,23$. Trotz des ab $t = 0$ am Führertisch vorgegebenen konstanten Zugkraftsollwerts $F_{soll} = 340$ kN steigt die tatsächlich ausgeübte Zugkraft F rampenförmig an. Dies ist die Wirkung des üblicherweise auf Fahrzeugen vorgesehenen, hier in der Begrenzungsstufe 1 enthaltenen Ruckbegrenzers.

Dieser sorgt dafür, daß das an die Begrenzerlogik 30 geführte Steuersignal M_b rampenförmig ansteigt (Achsenkreuz 2; Drehmomentmaßstab für einen Radsatz). Die Steuergrößen v_a und M_a stellen sicher, daß der Drehmomentsollwert M_{soll} für den Drehmomentregler dem Steuersignal M_b exakt folgt. Die Fahrzeugbeschleunigung b_z steigt proportional zur Zugkraft F und den Drehmomentensignalen M_b und M_{soll} linear an (Achsenkreuz 3). Die in der Beschleunigungsadaptionsstufe 2 gebildete adaptierte Fahrzeugbeschleunigung b_{ad} folgt der Fahrzeugbeschleunigung b_z in äquidistanten Schritten. Wie vorgesehen, liegt der Beschleunigungssollwert b_{soll} jeweils um den Beschleunigungshub Δb_1 größer als die adaptierte Fahrzeugbeschleunigung b_{ad} .

Der im Achsenkreuz 4 dargestellte Drehzahlsollwert n_{soll} und die Radsatzdrehzahl erhöhen sich entsprechend der linear anwachsenden Beschleunigung parabelförmig und sind nicht erkennbar verschieden. Gleiches gilt für die Radumfangsgeschwindigkeiten v und die Fahrzeuggeschwindigkeit v_z bis zum Zeitpunkt $t = 8,7$ s (Achsenkreuz 5).

In diesem Augenblick erreicht die vom Fahrmotor entwickelte Zugkraft F erstmalig die Kraftschlußgrenze F_{max} (Achsenkreuz 1). Dadurch löst sich der an die Drehmomentregelung weitergegebene Drehmoment Sollwert M_{soll} selbsttätig vom Steuersignal M_b (Achsenkreuz 2). Die Radschlupfregelung wechselt jetzt vom Begrenzerbetrieb in den Suchbetrieb. Das erste Suchspiel wird ausgelöst durch eine signifikante Rücknahme der Sollbeschleunigung b_{soll} (Achsenkreuz 3). Die weiteren Suchspiele zeichnen sich deutlich im folgenden Verlauf der Sollbeschleunigung mit Zusatz-Beschleunigungsanteil ab. Im Suchbetrieb folgt die adaptierte Fahrzeugbeschleunigung b_{ad} der Fahrzeugbeschleunigung b_z mit kleiner Differenz.

Die Drehzahlen n_{soll} und n_{ist} weisen bei nicht erkennbarer Differenz untereinander den für den Suchbetrieb typischen sägezahnförmigen Verlauf auf (Achsenkreuz 4). Das jeweils kurzzeitige, dem Betrag nach geringfügige Überfahren des Kraftschlußmaximums ist an der Differenz $\Delta v = v_u - v_z$ erkennbar (Achsenkreuz 5).

Die bei $t \approx \text{NN } 10,9$ s und $t \approx \text{NN } 14,2$ s im Verlauf des Ausgangssignals M_b der Begrenzungsstufen sichtbaren Änderungen sind Folge der bei Erreichen der zugehörigen Geschwindigkeiten sich ändernden Begrenzungslinien des F-v-Diagramms der Antriebsanlage (Achsenkreuz 2). Erst bei $t \approx \text{NN } 16,3$ s fällt die von der Antriebsanlage entwickelbare Zugkraft F unter den im Radaufstandspunkt übertragbaren Wert F_{max} mit der Folge der anschließenden Übereinstimmung von M_b und M_{soll} in dieser neuen Phase des Begrenzerbetriebs.

Die aus Achsenkreuz 3 ablesbaren Beschleunigungen b_{soll} , b_{ad} und b_z entsprechen den Zeitverläufen im Begrenzerbetrieb unmittelbar nach der Anfahrt. Allerdings verläuft jetzt die adaptierte Fahrzeugbeschleunigung b_{ad} stets geringfügig über der Fahrzeugbeschleunigung b_z . Wegen des im Begrenzerbetrieb ausnahmslos im ansteigenden Ast der Kraftschlußkennlinie liegenden Arbeitspunkts verschwindet die Varianz der Radsatzdrehzahl n_{ist} und ebenso die Differenzgeschwindigkeit $\Delta v = v_u - v_z$ bis auf einen nicht mehr erkennbaren Restbetrag.

2.9 Literatur

- /1/ DE 39 29 497 C2, /2/ DE 40 20 350 C2,
- /3/ DE 30 11 541 C2, /4/ DE 27 07 047 B2,
- /5/ DE 34 07 309 A1, /6/ EP 02 18 839 A2,
- /7/ EP 01 89 165 A2,
- /8/ Bauer, Hans- Peter; Pfeiffer, Rudolf; Hahn, Karl:
Optimale Kraftschlußausnutzung durch selbst adaptierende Radschlupfregelung am Beispiel eines Drehstrom- Lokomotivantriebes. Elektrische Bahnen 84 (1986) H. 2, S. 43-57
- /9/ Hahn, Karl:
Simulation einer selbst adaptierenden Radschlupfregelung für elektrische Triebfahrzeuge Elektrische Bahnen 87 (1989) H.2, S. 52-61,
- /10/ Körber, Joachim; Pfeiffer, Rudolf; Schlosser, Wolfgang:
Die Weiterentwicklung der Leistungs- und Steuerungselektronik gemäß den Anforderungen des modernen Schienenverkehrs. ZEV - Glas. Ann. 114 (1990) Nr.11/12, S. 503-511

zu Fig. 1:

- 1 Begrenzungsstufe
- 5 2 Beschleunigungsadaptionstufe
- 4 Suchlogik
- 5 Integrator
- 6 Multiplizierer
- 7 Drehzahlregler
- 10 8 Drehmomentregler + Umrichter + Fahrmotor
- 9 Antriebsstrang + Radaufstandspunkt
- 10 Extremwertspeicher
- 11 Subtrahierer
- 12 Subtrahierer
- 15 30 Begrenzungslogik
- 31 Beschleunigungslogik
- 32 Addierer
- 33 Addierer
- 34 Zusatzbeschleunigungslogik
- 20 35 Addierer
- 36 Differenzierer
- 37 Schweranfahrtslogik
- 38 Differenzierer

25

Patentansprüche

30

1. Verfahren zur selbsttätigen Radschlupfregelung von Fahrzeugen mit drehmomentgeregeltem Antrieb und vorzugsweise elektrischen Fahrmotoren unter Verwendung einer Beschleunigungssollwerte integrierenden Einrichtung und Bildung eines Drehzahlsollwerts (bzw. Geschwindigkeitssollwerts), der in Differenz zur Drehzahl des Fahrmotors, Radsatzes oder Rades den Antrieb für eine Anpassung der Radumfangbeschleunigung bzw. -verzögerung beeinflusst,

35

– bei dem einer Drehmomentregelung eine Drehzahlregelung überlagert ist, die eine Differenz eines durch Integration gewonnenen Drehzahlsollwerts n_{soll} mit der Drehzahl n_{ist} des Fahrmotors, des Radsatzes oder des Rades als Kriterium für die auf die Schiene oder Fahrbahn übertragene Zugkraft F_z wertet und daraus einen Drehmoment sollwert M_{soll} für den Drehmomentregler 8 ermittelt;

40

– bei dem der Drehzahlsollwert n_{soll} über einen dem Integrator 5 zugeführten Beschleunigungssollwert b_{soll} beeinflussbar ist;

– wobei ein Abfall des Drehmomentsollwerts M_{soll} nach anfänglicher Steigerung als Über- oder Unterschreitung einer jeweils optimalen, dem Kraftschlußmaximum zugeordneten Differenzgeschwindigkeit Δv_{opt} im Radaufstandspunkt gewertet und in eine Umschaltung des Beschleunigungssollwerts b_{soll} zwischen zwei Zuständen "Beschleunigungserhöhung" (b_1) oder "Beschleunigungsreduktion" (b_0) umgesetzt werden kann; **dadurch gekennzeichnet, daß**

45

– der Beschleunigungssollwert b_{soll} als Summe einer unmittelbar gemessenen oder aus der Fahrmotor-, Radsatz- oder Raddrehzahl n_{ist} adaptierten Fahrzeugbeschleunigung b_{ad} und einem veränderbaren Beschleunigungshub Δb unabhängig vom Verhältnis Zugkraftsollwert F_{soll} zur Zugmasse (-last) m bestimmt wird;

– die vom Fahrzeugführer vorgegebene und über eine Begrenzungsstufe 1 gebildete und vom Zugkraftsollwert F_{soll} abgeleitete Drehmomentsteuergröße M_b dann zu einer Neuberechnung des Geschwindigkeitssollwerts v_{soll} und des Drehmomentsollwerts M_{soll} führt, wenn dieser gleich oder größer wird als die Drehmomentsteuergröße M_b ;

50

– vor und nach der Umschaltung zwischen den Zuständen "Beschleunigungserhöhung" und "Beschleunigungsreduktion" eine Überprüfung der Radumfangbeschleunigung b_{ist} erfolgt, deren Ergebnis ein erneutes Umschalten verhindern, auslösen oder zu einer Beeinflussung des Beschleunigungshubs Δb führen kann;

– beim Bremsen ein Extremwertspeicher 10 als Minimalwertspeicher arbeitet, der im Fahrbetrieb als Maximalwertspeicher arbeitet;

55

– der vom Fahrzeugführer vorgegebene Bremskraftsollwert als negativer Zugkraftsollwert F_{soll} und der Beschleunigungshub Δb mit negativem Vorzeichen gewertet werden.

60

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Beschleunigungssollwert b_{soll} in Abhängigkeit eines binären Ausgangssignals einer Suchlogik 4 oder einer Begrenzungslogik 30, der gemessenen Fahrzeugbeschleunigung b_z oder adaptierten Fahrzeugbeschleunigung b_{ad} und eines Beschleunigungshubs Δb_1 oder Δb_0 gebildet wird:

$$b_1 = b_z + \Delta b_1 \text{ ("Beschleunigungserhöhung")}$$

$$b_0 = b_z - \Delta b_0 \text{ ("Beschleunigungsreduktion")}$$

65

oder:

$$b_1 = b_{ad} + \Delta b_1 \text{ ("Beschleunigungserhöhung")}$$

$$b_0 = b_{ad} - \Delta b_0 \text{ ("Beschleunigungsreduktion")}$$

3. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die in Umschaltzeitpunkten (t_1 , t_2) des binären Ausgangssignals der Suchlogik 4 gemessenen Drehzahlwerte $n_{ist}(t_1)$ bzw. $n_{ist}(t_2)$ gespeichert und eine adaptierte Fahrzeugbeschleunigung b_{ad} aus der Differenz dieser Drehzahlen, bezogen auf den zeitlichen Abstand der Messungen, berechnet wird:

$$b_{ad} = \frac{\pi \cdot D}{\ddot{u}} \cdot \frac{n_{ist}(t_2) - n_{ist}(t_1)}{t_2 - t_1}$$

mit:

D = Raddurchmesser

\ddot{u} = Getriebeübersetzung

4. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß ein Zählerstand z immer dann um 1 erhöht wird, wenn der Drehmomentsollwert M_{soll} gleich oder größer wird als die vom Fahrzeugführer vorgegebene und über die Begrenzungsstufe 1 gebildete Steuergröße M_b , und daß eine Adaption der Fahrzeugbeschleunigung veranlaßt wird, sobald der Zählerstand z den vorgegebenen Wert z_{max} erreicht hat, und sodann der Zählerstand auf Null zurückgesetzt wird.

5. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Umschaltung von "Beschleunigungsreduktion" auf "Beschleunigungserhöhung" erst dann ausgeführt wird, wenn für eine vorgegebene Zeit die Radumfangsbeschleunigung b_{ist} kleiner ist als die gemessene oder adaptierte Fahrzeugbeschleunigung abzüglich einer Sicherheitschwelle Δb_s :

$$b_{ist} < b_z - \Delta b_s$$

oder:

$$b_{ist} < b_{ad} - \Delta b$$

6. Verfahren nach Anspruch 1; dadurch gekennzeichnet, daß beim Umschalten von "Beschleunigungsreduktion" auf "Beschleunigungserhöhung" die Radumfangsbeschleunigung b_{ist} abgespeichert ($b_{sp} = b_{ist}$) und nach der Umschaltung die Radumfangsbeschleunigung mit dem abgespeicherten Wert b verglichen wird, wobei das Ergebnis des Vergleichs zur Veränderung des Beschleunigungssollwerts b_{soll} verwendet wird.

7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß der Beschleunigungssollwert b_0 verkleinert wird, wenn sich die Radumfangsbeschleunigung b_{ist} nicht innerhalb einer vorgebbaren Zeit nach dem Umschalten von "Beschleunigungserhöhung" auf "Beschleunigungsreduktion" um einen bestimmten Wert verkleinert hat.

8. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Abweichung zwischen Beschleunigungssollwert b_{soll} und Radumfangsbeschleunigung b_{ist} zur Veränderung des Beschleunigungssollwerts b_{soll} verwendet wird.

9. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß der bei zu großen Abweichungen zwischen Beschleunigungssollwert b_{soll} und Radumfangsbeschleunigung b_{ist} veränderte Beschleunigungssollwert b_{sollk} nach der folgenden Formel bestimmt wird:

$$b_{sollk} = b_{soll} + K_{F1} \cdot (b_{ist} - b_{soll})^y \text{ ("Beschleunigungserhöhung")}$$

mit: y = Exponent

K_{F1} = Konstante

$$b_{sollk} = b_{soll} - K_{F2} \cdot (b_{ist} - b_{soll})^y \text{ ("Beschleunigungsreduktion")}$$

mit: y = Exponent

K_{F2} = Konstante

10. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß, sobald der vom Drehzahlregler 7 berechnete Drehmomentsollwert M_{soll} größer wird als die vom Fahrzeugführer vorgegebene und über die Begrenzungsstufe 1 gebildete Steuergröße M_b , der Ausgangswert des Integrators 5 und die Größen des Drehzahlreglers 7 auf neu ermittelte Werte gesetzt werden.

11. Verfahren nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, daß, sobald der Drehmomentsollwert M_{soll} größer wird als die vom Fahrzeugführer vorgegebene und über die Begrenzungsstufe 1 gebildete Steuergröße M_b , der Ausgangswert v_{soll} des Integrators 5 und der Drehmomentsollwert M_{soll} des Drehzahlreglers bei Verwendung eines P-Reglers nach folgenden Formeln bestimmt werden:

$$v_{\text{soll}} = \frac{\pi \cdot D}{\ddot{u}} \cdot \left[\frac{K_r \cdot M_b}{KPDR} + n_{\text{ist}} \right]$$

oder:

$$v_{\text{soll}} = \frac{\pi \cdot D}{\ddot{u}} \cdot n_{\text{istg}} - K_{\text{red}}$$

$$M_{\text{soll}} = KPDR \cdot \left[\frac{\ddot{u}}{\pi \cdot D} \cdot v_{\text{soll}} - n_{\text{ist}} \right]$$

oder:

$$M_{\text{soll}} = M_b$$

mit:

D = Raddurchmesser

\ddot{u} = Getriebeübersetzung

K_r = Reduktionsfaktor

K_{red} = Reduktionswert

n_{istg} = geglättete Drehzahl

KPDR = Proportionalverstärkung des Drehzahlreglers

12. Verfahren nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, daß, sobald der Drehmomentsollwert M_{soll} größer wird als die vom Fahrzeugführer vorgegebene und über die Begrenzungsstufe 1 gebildete Steuergröße M_b , der Ausgangswert v_{soll} des Integrators 5 und der Drehmomentsollwert M_{soll} des Drehzahlreglers 7 bei Verwendung eines PI-Reglers nach folgenden Formeln bestimmt werden:

$$v_{\text{soll}} = v_{\text{sollalt}} - K_{\text{red}}$$

oder:

$$v_{\text{soll}} = \frac{\pi \cdot D}{\ddot{u}} \cdot n_{\text{istg}} - K_{\text{red}}$$

$$M_P = KPDR \cdot \left(\frac{\ddot{u}}{\pi \cdot D} \cdot v_{\text{soll}} - n_{\text{ist}} \right)$$

$$M_I = M_b - M_P$$

$$M_{\text{soll}} = M_P + M_I$$

mit:

D = Raddurchmesser

\ddot{u} = Getriebeübersetzung

K_{red} = Reduktionswert

v_{sollalt} = vorheriger Geschwindigkeitssollwert

n_{istg} = geglättete Drehzahl

KPDR = Proportionalverstärkung des Drehzahlreglers

M_P = P-Anteil des Drehzahlreglers

M_I = I-Anteil des Drehzahlreglers

13. Verfahren nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, daß, sobald der Drehmomentsollwert M_{soll} größer wird als die vom Fahrzeugführer vorgegebene und über die Begrenzungsstufe 1 gebildete Steuergröße M_b , der Ausgangswert v_{soll} des Integrators 5 und der Drehmomentsollwert M_{soll} des Drehzahlreglers 7 bei Verwendung eines PI-Reglers nach folgenden Formeln bestimmt werden:

$$v_{\text{soll}} = v_{\text{sollalt}} \text{ für } n_{\text{soll}} \geq n_{\text{ist}}$$

$$v_{\text{soll}} = v_{\text{soll}} + K_v \text{ für } n_{\text{soll}} < n_{\text{ist}}$$

$$M_I = M_b$$

$$M_{\text{soll}} = M_I$$

mit:

K_v = Vergrößerungswert

V_{sollah} = vorheriger Geschwindigkeitssollwert

M_I = I-Anteil des Drehzahlreglers

14. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß zur Anfahrt eines sehr schweren Zuges eine Schweranfahrtslogik 37 beim oder nach dem Umschalten von "Beschleunigungserhöhung" auf "Beschleunigungsreduktion" überprüft, ob die Drehzahl n_{ist} kleiner als eine vorgebbare Drehzahlschwelle n_{sa} ist, und bei erfüllter Bedingung den Drehzahlsollwert des Integrators 5 auf einen konstanten ($b_{soll} = 0$) oder näherungsweise konstanten ($b_{soll} \approx 0$) Wert setzt.

15. Verfahren nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, daß die Schweranfahrtslogik 37 den Geschwindigkeitssollwert v_{soll} solange auf einen konstanten oder näherungsweise konstanten Wert setzt, bis der Zug beschleunigt und damit anfährt, und erst dann die "Beschleunigungserhöhung" ($b_{soll} = b_1$) vorgibt.

16. Verfahren nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, daß aufgrund der Verkleinerung des sehr stark geglätteten Drehmomentsollwerts M_{soll} mit dem Extremwertspeicher 10 und der Suchlogik 4 erkannt wird, wann sich der Zug in Bewegung setzt.

17. Anordnung zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 1, die einen Integrator 5 enthält, dessen Ausgangsgröße v_{soll} über einen den Raddurchmesser D und die Getriebeübersetzung \bar{u} berücksichtigenden Multiplizierer 6 einem Subtrahierer 11 zugeführt wird, in dem ein Vergleich des Drehzahlsollwerts n_{soll} mit dem Drehzahlwert n_{ist} erfolgt, und dessen Drehzahldifferenz an einen Drehzahlregler 7 gelegt ist, der einen Drehmomentregler 8 steuert, wobei der Drehmomentsollwert M_{soll} gleichzeitig dem eine Suchlogik 4 steuernden Extremwertspeicher 10 und einem Subtrahierer 12 zugeführt wird, und die als kennzeichnende Merkmale enthält:

- eine Beschleunigungslogik 31 und eine Beschleunigungsadaptionstufe 2, deren Ausgangswerte Δb und b_{ad} in einem Addierer 32 summiert und dem Integrator 5 zugeführt werden;
- eine Begrenzungslogik 30, in der das vom Fahrzeugführer vorgegebene und über eine Begrenzungstufe 1 geführte Signal M_b mit dem Ausgangssignal M_{soll} des Drehzahlreglers verglichen und die Ausgangssignale v_a und M_a gebildet werden, die dem Integrator 5 bzw. dem Drehzahlregler 7 zugeführt werden;
- einen Differenzierer 38 zur Bestimmung der momentanen Radumfangbeschleunigung b_{ist} , die der Beschleunigungslogik 31 zugeführt wird.

18. Anordnung nach Anspruch 17, dadurch gekennzeichnet, daß dem Integrator 5 über den Addierer 33 die Summe des Beschleunigungssollwerts b_{soll} und einem von einer Zusatzbeschleunigungslogik 34 gebildeten Beschleunigungswert zugeführt wird, wobei die Zusatzbeschleunigungslogik 34 ihr Eingangssignal über einen Subtrahierer 35 erhält als Differenz zwischen Beschleunigungssollwert b_{soll} und Radumfangbeschleunigung b_{ist} , die über den Differenzierer 36 aus dem Drehzahlwert n_{ist} gebildet wird.

19. Anordnung nach Anspruch 17 oder 18, dadurch gekennzeichnet, daß die Begrenzungslogik 30 über Steuergrößen die Beschleunigungsadaptionstufe 2, den Extremwertspeicher 10 und die Beschleunigungslogik 31 beeinflusst.

20. Anordnung nach Anspruch 17 oder 18 oder 19, dadurch gekennzeichnet, daß der Drehzahlwert n_{ist} einer Schweranfahrtslogik 37 zugeführt wird, die über eine Steuergröße die Ausgangsgröße v_{soll} des Integrators 5 auf einen konstanten oder näherungsweise konstanten Wert setzen kann.

Hierzu 3 Seite(n) Zeichnungen

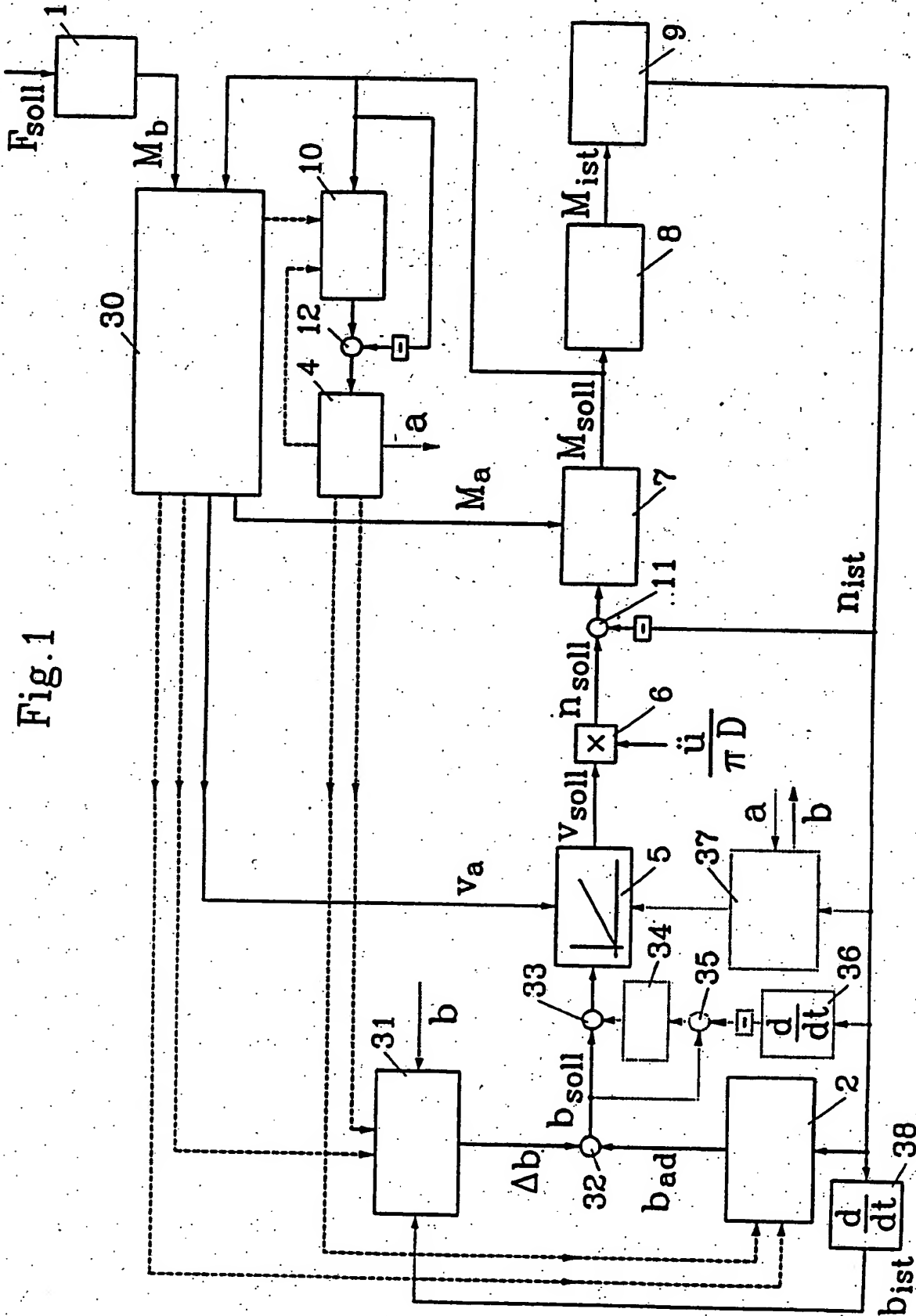
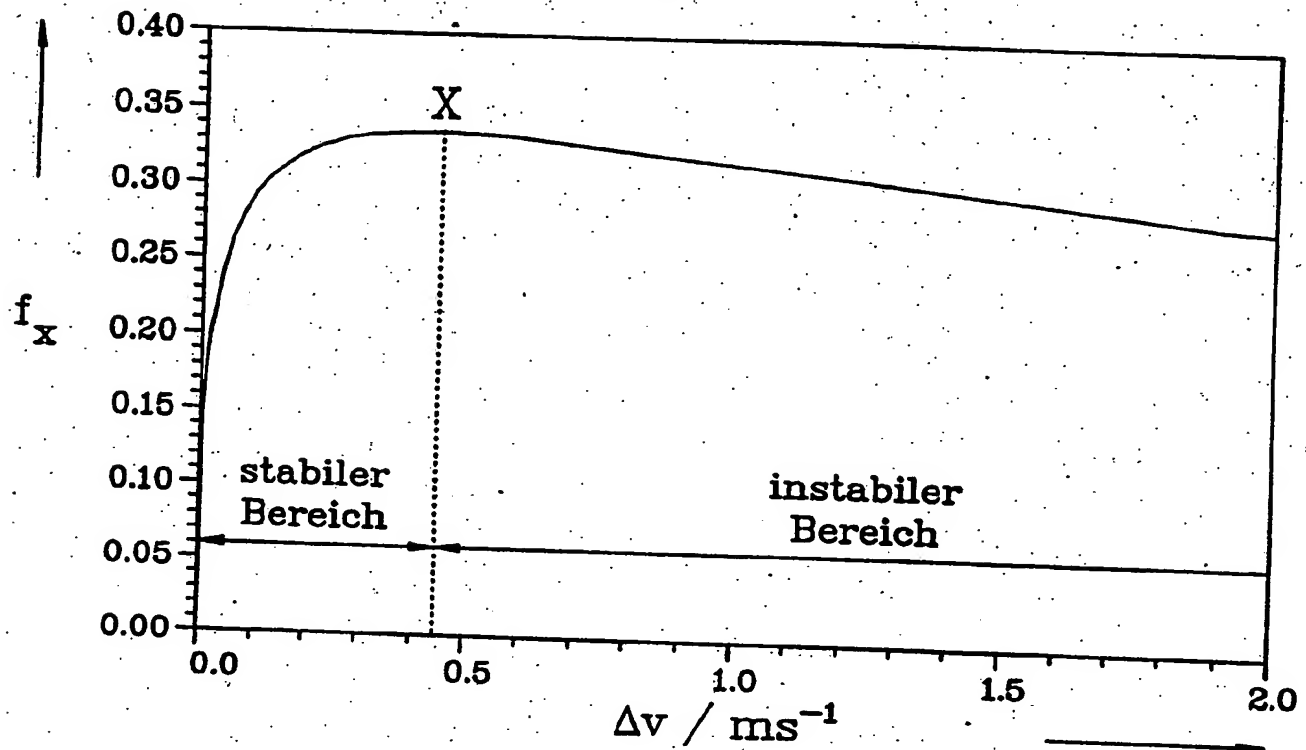


Fig.2



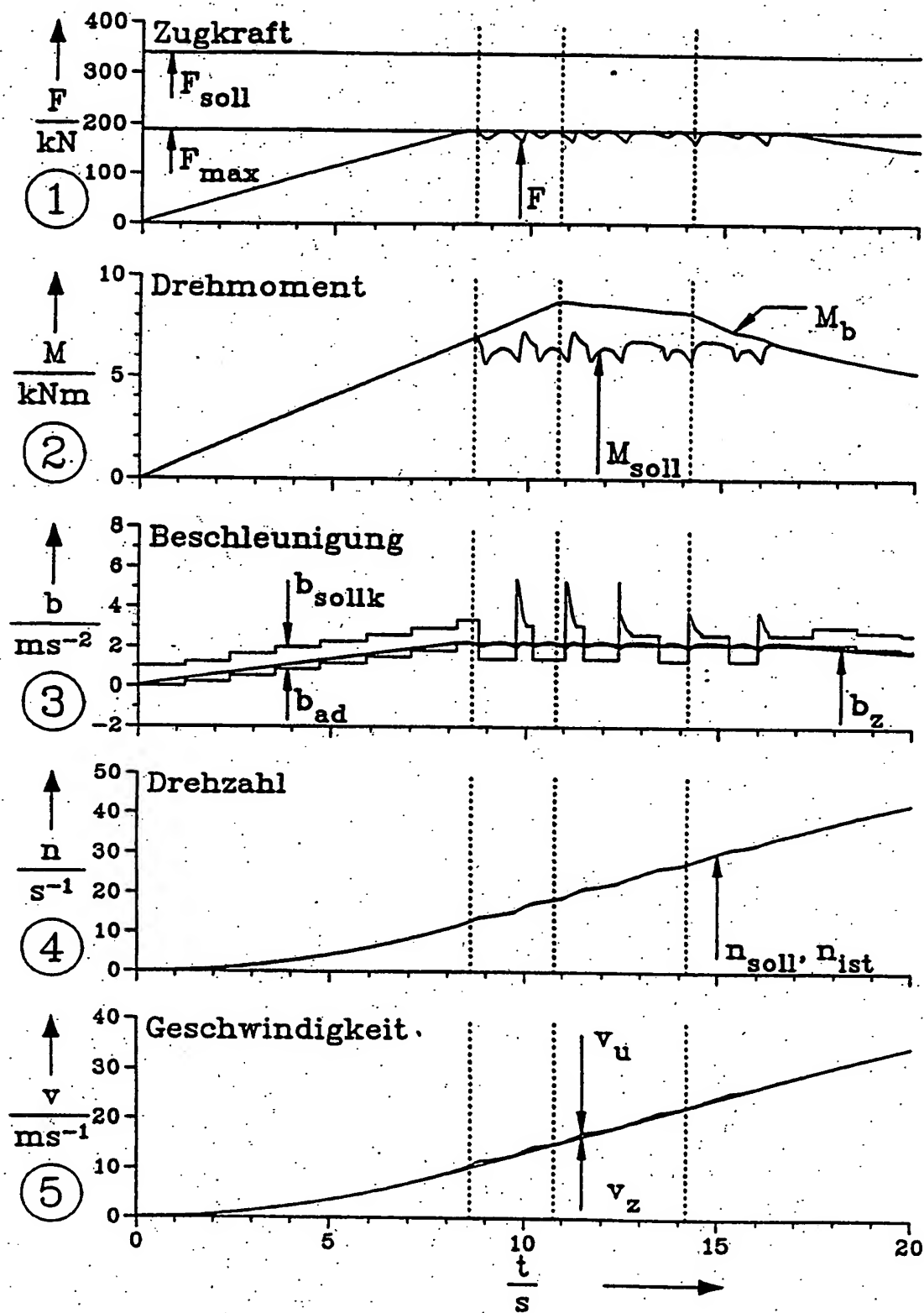


Fig. 3

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☐ FADED TEXT OR DRAWING
- ☒ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☐ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.